

# 新しい建築構造用高強度鋼材 550 N/mm<sup>2</sup> 級鋼の特徴

## The Features of New High-strength Steel Materials “550 N/mm<sup>2</sup> Class” for Building Frames

村上 行夫 MURAKAMI Yukio JFE スチール 建材センター 建材技術部建築技術室 主任部員(副課長)  
藤沢 清二 FUJISAWA Seiji JFE スチール 建材センター 建材技術部建築技術室 主任部員(副課長)  
藤澤 一善 FUJISAWA Kazuyoshi JFE スチール 建材センター 建材技術部建築技術室 主任部員(副部長)

### 要旨

*Super-OLAC* を適用した引張強さが 550 N/mm<sup>2</sup> 級の建築構造用高強度鋼材を開発した。製品は厚板「HBL385」、円形鋼管「P-385」、角形鋼管「P コラム G385」である。これらの商品は従来鋼の溶接加工性を維持しながら高強度、高耐震性を実現したものである。角形鋼管の部材実験結果では、柱材として必要とされる累積塑性変形倍率 30 を十分確保できることが確認された。また、圧延 H 形鋼「HBL-H385」についても開発中である。さらに、本製品の定性的なメリットや課題を発掘するため試設計を実施し、その結果、全層の梁を置換すると剛性低下により層間変形角が 2 割以上増し、クライテリア確保が困難となるが、柱を置換した場合は実用上問題がないこと、本製品を当初から使用する設計とすれば適用可能範囲はさらに広がることなどの結果を得た。

### Abstract:

JFE Steel has developed new high-strength steel with lower limit tensile strength of 550 N/mm<sup>2</sup> for building frames. The series of the product are made up of a plate “HBL385,” a circular tube “P-385,” and a square tube “P column G385.” These products realized high-strength and excellent earthquake-resistance with equivalent weldability to conventional steel. Furthermore, roll formed H shapes, “HBL-H385,” are under development. Design trial is carried out to study advantages and problems to be solved of the products. The result shows that it is difficult to secure criteria for interchanges of all beams and that there is no practical problems for interchanges of columns.

### 1. はじめに

高層建築物に使用される鋼材は、490 N/mm<sup>2</sup> 級の SN 材や TMCP (thermo-mechanical control process) 鋼板などが一般的である。一方、さらに高強度のものとして 590 N/mm<sup>2</sup> 級鋼があるが、製造工程において合金元素の添加や複雑な熱処理が必要となり、また、溶接施工においても予熱管理、入熱制限など特別な管理が求められるなどの理由により、全面的な普及までには至っていない。このような背景のもと、良好な溶接性・耐震性を合わせ持つ高強度鋼材のニーズが生まれた。このニーズに対応し、JFE スチールでは急速冷却と均一冷却を両立した最先端のオンライン加速冷却装置である *Super-OLAC* を適用した引張強さが 550 N/mm<sup>2</sup> 級の建築構造用高強度鋼材を開発した。

### 2. 製品の特徴

開発した 550 N/mm<sup>2</sup> 級建築構造用高強度鋼材は設計基

準強度が 385 N/mm<sup>2</sup> であり、品種としては厚板「HBL385」、円形鋼管「P-385」、角形鋼管「P コラム G385」(以下、385 シリーズ)がある。さらに、圧延 H 形鋼「HBL-H385」に関しても現在開発中の段階にある。385 シリーズの化学成分を **Table 1** に、機械的性質を **Table 2** に示す。

#### 2.1 厚板「HBL385」

HBL385 は 2002 年 2 月に大臣認定を取得した TMCP 厚板であり、非調質鋼材としては最高の基準強度 (385 N/mm<sup>2</sup>) を取得している。**Fig. 1**、**2** および **Table 3** に機械的特性の一例を示す。*Super-OLAC* の急速冷却および均一冷却技術の特長をいかし、最適成分設計により高強度、低 YR (降伏比) を実現しており、さらに  $C_{eq}$  (炭素当量)、 $P_{CM}$  (溶接割れ感受組成) を 520 N/mm<sup>2</sup> 鋼レベルに抑えることで優れた溶接性を具備している (溶接継手性能などの詳細事項は文献<sup>1)</sup>を参照)。本製品は優れた耐震性・溶接性を合わせ持つため、発売開始以来、その優位性が評価され、2004 年度から著名な大型物件で本格的に採用され始めている。

Table 1 Chemical compositions of 385 series

(mass%)

Grade	C	Si	Mn	P	S	N	C <sub>eq</sub>	P <sub>CM</sub>	f <sub>HAZ</sub>
HBL385B	≦0.18	≦0.55	≦1.60	≦0.030	≦0.015	-	≦0.40*	≦0.26*	-
HBL385C				≦0.020	≦0.008		≦0.42**	≦0.27**	
P-385B	≦0.20	≦0.55	≦1.60	≦0.030	≦0.015	≦0.006	≦0.40*	≦0.26*	≦0.58
P-385C				≦0.020	≦0.008		≦0.42**	≦0.27**	
P column G385B	≦0.20	≦0.55	≦1.60	≦0.030	≦0.015	≦0.006	≦0.40	≦0.26	≦0.58
P column G385C				≦0.020	≦0.008		≦0.40	≦0.26	

\*t ≦ 50, \*\*t > 50

C<sub>eq</sub> = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

P<sub>CM</sub> = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

f<sub>HAZ</sub> = C + Mn/8 + 6(P + S) + 12N - 4Ti

Table 2 Mechanical properties of 385 series

Grade	YS (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	El (%)	YR (%)	√E <sub>0°C</sub> (J)	RA <sub>Z</sub> (%)	
HBL385B, C	385-505	550-670	≧26*	≧80	≧70	C	≧25(average)
			≧20**				≧15(each)
P-385B, C	385-535	550-700	≧26*	≧85	≧70	C	≧25(average)
			≧20**				≧15(each)
P column G385B, C	385-505	550-670	≧26*	≧80	≧70***	C	≧25(average)
			≧20**				≧15(each)

\* T.P.: JIS No. 5, \*\* T.P.: JIS No. 4, \*\*\* T.P.: at flat part

YS: Yield strength, TS: Tensile strength, El: Elongation, YR: Yield ratio

√E<sub>0°C</sub>: Charpy absorbed energy at 0°C

RA<sub>Z</sub>: Reduction of area in through thickness tensile test (Z)

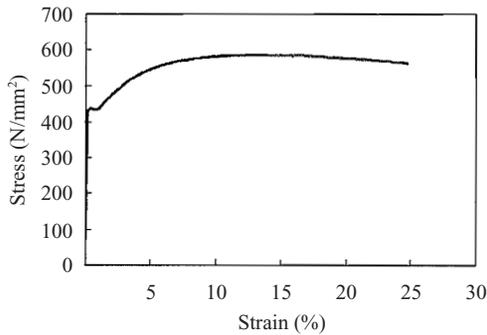


Fig.1 Stress-strain relationship (t = 32 mm)

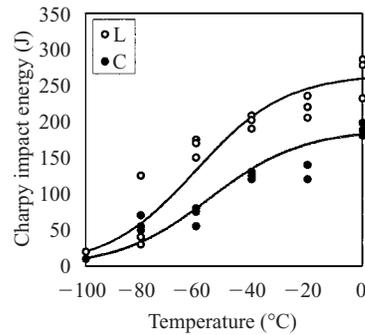


Fig.2 Charpy impact property (t = 32 mm)

Table 3 Mechanical properties of HBL385

Thickness (mm)	YS (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	El (%)	YR (%)	√E <sub>0°C</sub> (J)	RA <sub>Z</sub> (%)
19	422	552	44	76	289	74, 70, 74
32	423	569	37	74	189	74, 72, 71
35	458	593	32	77	269	73, 73, 72
70	445	596	31	75	290	76, 74, 74
100	432	578	31	75	247	72, 69, 71

Tensile test: Full thickness (JIS No. 5)-C(19 t), 1/4t(JIS No.4)-C(32, 35, 70, 100 t)

Charpy test: 1/4t-C, RA<sub>Z</sub>: Z

## 2.2 円形鋼管 [P-385]

P-385 は、2003 年 8 月に大臣認定を取得した円形鋼管であり、造管方法としては UOE とプレスバンドの 2 種類がある。円形鋼管（厚板を曲げ加工）であるため YP（降伏強さ）レンジ、TS（引張り強さ）レンジおよび YR 規定は

JIS の STKN 規格に準拠しているが、その他の材料特性はすべて HBL385 に準拠している。

## 2.3 角形鋼管 [P コラム G385]

P コラム G385 は JFE スチールと (株)セイケイが共同開発した 550 N/mm<sup>2</sup> 級冷間プレス成形角形鋼管である。(株)

セイケイにて大臣認定を取得（2004年11月）しており、厚板製造はJFEスチールが、造管および販売は（株）セイケイによる。角部を除く平板部はHBL385と同等の性能を有している。設計に関しては「冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル」<sup>2)</sup>に準拠し、BCP325の設計基準強度を385 N/mm<sup>2</sup>に読み替えて適用する。以下に、PコラムG385の部材曲げ実験結果をもとにその構造性能について紹介する。

(1) 実験概要

実験概要を Fig. 3 および Table 4 に示す。部材の全塑性モーメント Mp に対応する基準変位  $\delta_p$  を用い、1/2 の変形量で正負1回加力した後、1倍、2倍、4倍、6倍、8倍、…の変形量を各2回与える正負交番

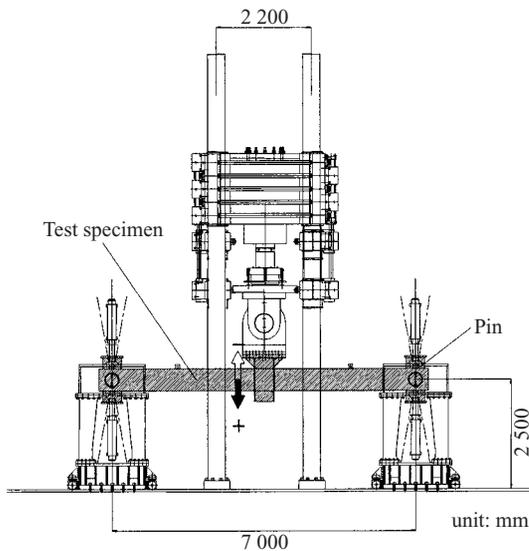


Fig. 3 Test setup

繰返し载荷を行った。試験体は Fig. 3 にあるように、中央部に通しダイアフラムを溶接した3点曲げ試験体である。Table 4 において、試験体 No. 3 を標準試験体とし、No. 2 は载荷入力方向による影響、No. 4 は NBFW 法（non brittle fracture welding：脆性破断防止溶接法、詳細は文献<sup>2)</sup>を参照）の影響、No. 5 は幅厚比の影響をそれぞれ検討するため準備された。以上は終局が破断と予想される FA ランクの試験体であるが、その他に局部座屈による終局を考察するため、FB ランクの試験体 No. 1 を用意した。Table 5 にそれぞれの試験体の機械的性質を示す。いずれも高い角部靱性を有している。なお、コラム角部強度は最大で 654 N/mm<sup>2</sup> となっており、これより、ダイアフラムとの溶接材料を YGW21（JIS Z 3312）とした。

(2) 実験結果

Fig. 4 に代表例として試験体 No. 3 の履歴ループを示す。6 $\delta_p$  までの変形に耐えており、履歴ループも紡錘型の安定した形状となっている。Photo 1 に実験終了後のダイアフラム近傍溶接部を示す。NBFW 法とした試験体 No. 3 では、破断線がビード線からコラム母材側に流れているのに対し、従来溶接法とした試験体 No. 4 では、コラム母材側とともにビード線上の HAZ 軟化部を流れている。この影響により、塑性変形性能は試験体 No. 3 の方が No. 4 を上回っており、NBFW 法の効果が確認できた。Fig. 5 は塑性変形性能について、従来のコラムと比較した結果である。今回の試験結果をその試験体番号とともに示す。これらから P コラム G385 の累積塑性変形倍率は、Fig. 5 の2つの鎖線の間の領域にプロットされると予想される。NBFW

Table 4 List of test specimen

Test specimen	Load direction	Figure						Section performance			
		B (mm)	t (mm)	B/t	Rank of B/t	Welding method	A (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	Z (cm <sup>3</sup> )	Zp (cm <sup>3</sup> )	
No. 1	C50019-00-1	0°	500	19	26.3	FB	NBFW	347	129 554	5 182	6 131
No. 2	C50032-00-1	0°	500	32	15.6	FA	NBFW	546	186 845	7 474	9 206
No. 3	C50032-45-1	45°	500	32	15.6	FA	NBFW	546	186 845	6 083	8 920
No. 4	C50032-45-0	45°	500	32	15.6	FA	Normal	546	186 845	6 083	8 920
No. 5	C60032-45-1	45°	600	32	18.8	FA	NBFW	674	344 744	9 124	13 421

Table 5 Material properties

Test specimen	Flat part					Corner part				
	YS (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	EI (%)	YR (%)	$\sqrt{E_{0°C}}$ (J)	YS (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	EI (%)	YR (%)	$\sqrt{E_{0°C}}$ (J)
No. 1	431	567	36.5	76.0	327	534	580	40.5	92.1	292
No. 2	456	615	44.7	74.1	336	601	654	44.5	92.0	298
No. 3	454	591	46.1	76.8	298	564	639	49.5	88.4	311
No. 4	485	647	44.9	75.1	244	579	635	45.0	91.5	297
No. 5	456	615	44.7	74.1	336	590	651	45.0	90.5	298

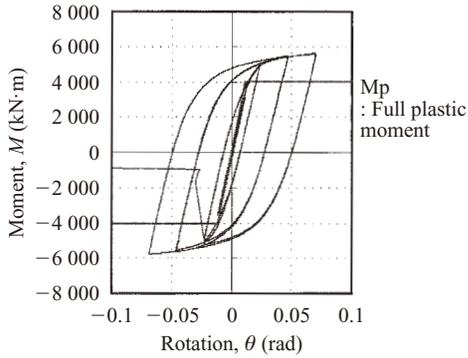


Fig. 4 Test result (Moment-rotation relationship)

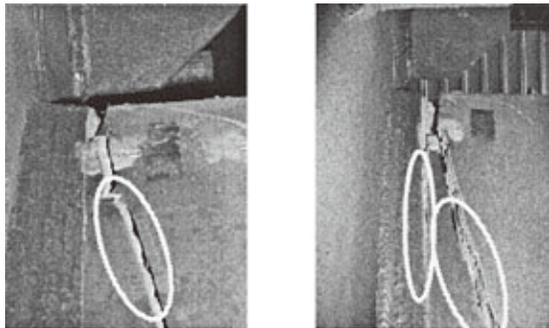


Photo 1 Fracture parts

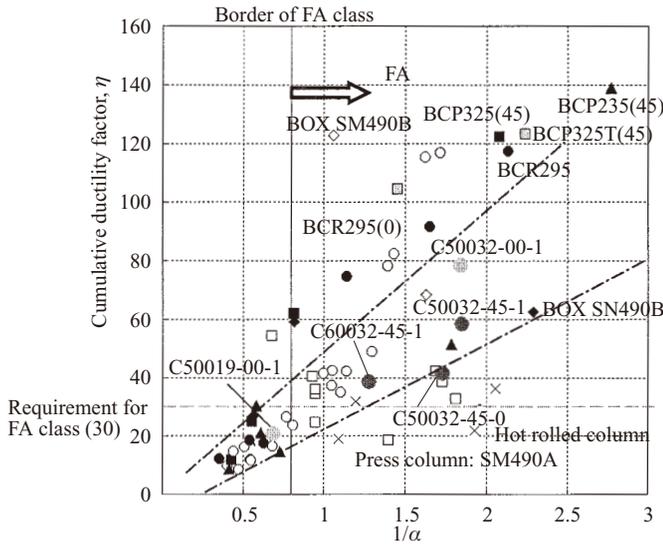


Fig. 5 Relationship between cumulative ductility factor,  $\eta$  and general width-thickness ratio,  $\alpha$

溶接法を使用しなかった試験体も含め全ての FA ランク試験体について、必要とされる累積塑性変形倍率 30 を上回っており、従来のコラムと比較しても同等な塑性変形能力を持っている。以上、P コラム G385 は実用上問題ない塑性変形性能を有していることが確認された。

### 2.4 圧延 H 形鋼「HBL-H385」

HBL-H385 は、Super-OLAC S を適用し、HBL385 と同等の材料特性を目指した圧延 H 形鋼である。なお、本製品に関しては現在開発中であるため、内容詳細については次の機会に紹介する。

## 3. 試設計検討

本章では、385 シリーズを高層建築物に適用した際の定性的なメリットや問題点・課題を発掘するために実施した試設計について述べる。

### 3.1 対象建築物と試設計方法

試設計の対象は Fig. 6 に示す高さ 122 m、25 階建ての超高層建築物とした。平面は整形であり制振ダンパーを配している。柱の断面形状は箱形断面（以下、BOX）、H 形断面、円形断面（CFT）の 3 種が使用されている。Table 6 に原設計で使用されている最大断面を示す。BOX 断面は □-600 × 70（TMC325）、H 形断面は H-612 × 520 × 70 × 80

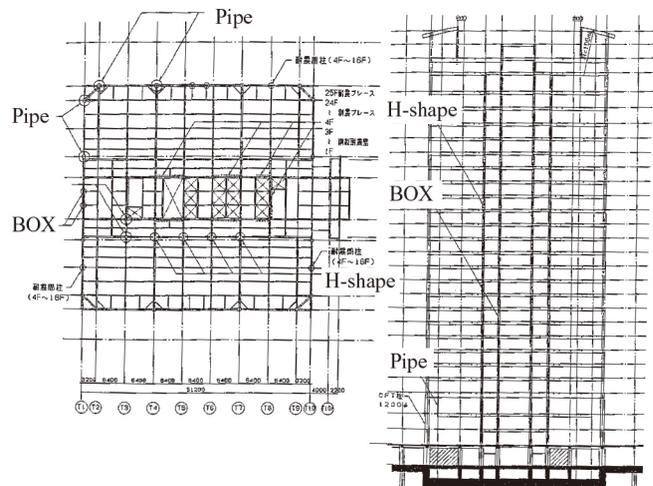


Fig. 6 Building for trying to design

Table 6 Maximum member section

	Original design		Interchange	
BOX	□-600 × 70	“TMC325”	□-600 × 60	“HBL385”
H-shape	H-612 × 520 × 70 × 80	“TMC325”	H-592 × 510 × 60 × 70	“HBL385”
Pipe (CFT)	○-1 200 × 50	“TMC325”	○-1 200 × 40	“HBL385”
Beam (H-shape)	H-1 500 × 400 × 16 × 40	“SN490”	H-1 500 × 400 × 16 × 32	“HBL385”

(TMC325), 円形断面は○-1 200 × 50 (TMC325) である。試設計方法は, 既存部材を強度差により断面置換し, 置換後の建物性状を確認することとした。部材の置換は Case 1 が梁, Case 2 が柱, Case 3 が梁と柱, Case 4 が 10 階以下の梁と柱とし, 計 4 Case とした。置換に際しては, Table 6 に示すように, 断面せいおよび幅は変えず厚さのみを強度比で変更し, 厚さは標準板厚とした。なお梁の置換に際してはフランジのみを対象とした。

### 3.2 試設計結果

試設計後の鋼材重量を Table 7 に示す。原設計に対する全体の鋼材重量は, Case 1 で 4.3 %, Case 2 で 2.6 %, Case 3 で 6.9 %, Case 4 で 4.3% 減となった。部材別に着目すると, 柱を置換すると原設計に対して 6% 減, 梁を全層に渡り置換すると 10% 減, 10 階以下で置換すると 4% 減となった。各 Case の建物の一次固有周期を Table 8 に示す。原設計と比較し, 梁を置換する Case 1 および 3 は増大, 柱置換の Case 2 はほとんど変化がない。10 階以下の柱梁を変更した Case 4 はその中間値となっている。1 次設計時と 2 次設計時の建物層間変形角を, 原設計を 100% とし, Fig. 7 に示す。なお, 二次設計は極希に発生する地震を想定している。梁を置換した Case 1, Case 3 は上層階の剛性低下が顕著であり, 二次設計時に中間階から上層階の層間変形が原設計から 2 割以上増しクライテリアを満足できなくなっている。柱を置換した Case 2 は十分に変更可能であり, 10 階以下を置換した Case 4 もクライテリアを満足している。次に, 一次, 二次設計時のダンパー分担率比較を Fig. 8 に示す。層間変形クライテリアが厳しくなる中高層部では, Case 1, 3 の梁を変更したもののダンパー分担率が著しく低下している。Case 1, 3 の場合, クライテリア確保のためにさらにダンパー量を増やしてもフレームの剛性自体が低下しているため, 変形量を減少させることは難しい。

Table 7 Quantity of steel as a result of trying to design

Quantity of Steel	(unit:t)				
	Original	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Total	9 607 (100%)	9 194 (96%)	9 356 (97%)	8 943 (93%)	9 190 (96%)
Columns	3 881 (100%)	3 881 (100%)	3 630 (94%)	3 630 (94%)	3 630 (94%)
Beams	4 190 (100%)	3 777 (90%)	4 190 (100%)	3 777 (90%)	4 024 (96%)
Others	1 535 (100%)				

Table 8 Primary natural period as a result of trying to design

Natural period	(unit:s)				
	Original	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
X direction	3.14	3.23	3.15	3.24	3.19
Y direction	3.02	3.09	3.03	3.11	3.08

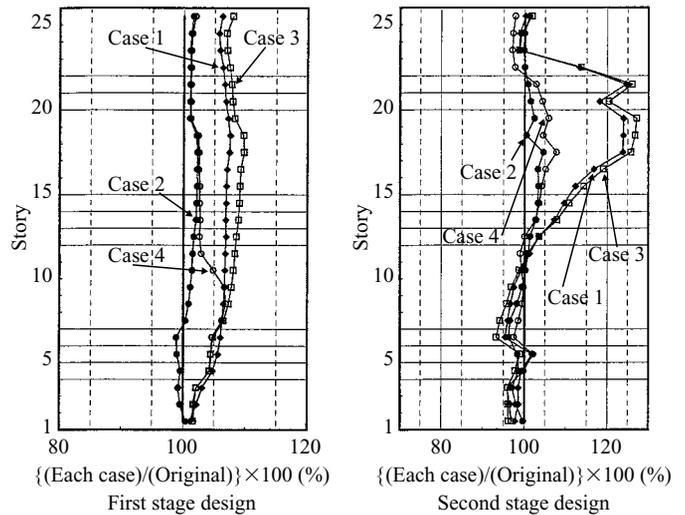


Fig.7 Story drift

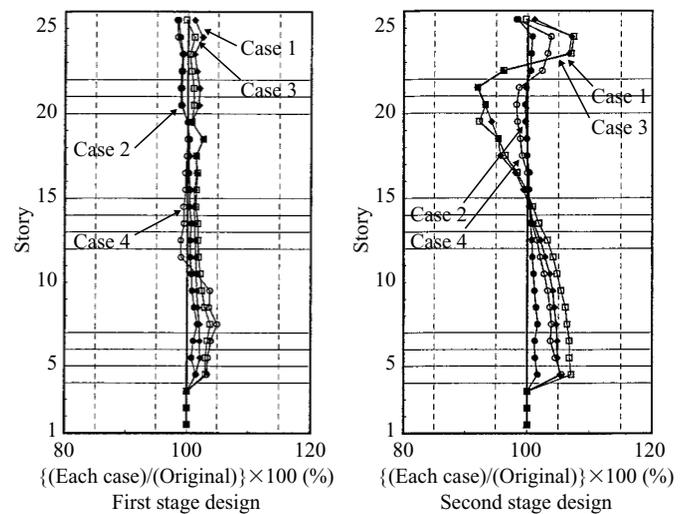


Fig.8 Contributinal ratio of damper

い。本建物の場合, 全層の梁を置換すると剛性低下が著しく, クライテリア確保が困難となる。柱を置換した Case 2 の場合, クライテリアは十分に確保されており, 実用上問題がない。また Case 4 の 10 階以下の梁置換も同様である。今回検討した結果からは, 490 N/mm<sup>2</sup> 鋼柱を HBL385 に置換することは鋼重削減効果を目指すことができ, 設計クライテリアとしても問題がないといえる。また, 下層階のみであれば HBL385 を梁に適用することは十分に可能である。今回は 490 N/mm<sup>2</sup> 鋼からの置換による試設計であったが, HBL385 を当初から使用する設計とすれば, 適用可能範囲はさらに広がるものと思われる。

### 4. おわりに

現在 385 シリーズに関しては, 厚板, 円形鋼管, 角形鋼管と主な建築構造用部材断面の商品化が完了し, 建築構造用としての高い性能を確認した。また, 試設計によって

385 シリーズの適用によって鋼重削減が可能であることも確認できた。これによって、Only 1 商品として多様化する建築設計ニーズに対応可能となり、今後圧延 H 形鋼の開発が完了すると、すべての建築構造用品種に対して対応が可能となる。

**参考文献**

- 1) 林謙次, 藤沢清二, 中川一郎, JFE 技報 No. 5, 2004, p. 45.
- 2) 日本建築センター, 冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル (改訂版), 2003.



村上 行夫



藤沢 清二



藤澤 一善